

北京航空航天大学学报

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics

ISSN 1001-5965, CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目: 同轴旋转圆台环隙间流动特性分析
作者: 鲍锋, 卢愿, 曾华轮, 涂立
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0170
收稿日期: 2019-04-18
网络首发日期: 2019-07-31
引用格式: 鲍锋, 卢愿, 曾华轮, 涂立. 同轴旋转圆台环隙间流动特性分析. 北京航空航天大学学报. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0170>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

同轴旋转圆台环隙间流动特性分析

鲍锋^{1✉}, 卢愿¹, 曾华轮¹, 涂立¹

(1 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102)

✉通信作者 鲍锋 Email:fbao@xmu.edu.cn

摘要 本文对同轴旋转倒置圆台环隙间流体复杂流动特性进行实验研究。重点进行染色液显示试验和 PIV (Particle Image Velocimetry) 流场测量, 对实验结果做定性及定量分析, 研究旋转速度和环隙宽度对环隙流动特性的影响。染色液显示实验和 PIV 流场测速实验分别定性和定量地展现环隙间螺旋涡的产生及变化过程。对不同内筒转速和环隙宽度下的螺旋涡运动周期进行分析, 结果表明内筒转速升高, 周期减小; 环隙宽度增大, 周期增大。本文运用瞬时流动和时均流场解析了环隙间螺旋涡运动产生机制, 探究内筒转速和环隙宽度对三种雷诺应力大小的影响与分布情况。内筒转速变化, 雷诺径向正应力始终最大; 环隙宽度变化, 雷诺切应力始终最小。

关键词 环隙间流动、涡心周期运动、染色液、PIV、内筒转速

中图分类号 V211.76

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0170

Flow Characteristics between Annulus of Coaxial Rotational Cones

BAO Feng^{1✉}, LU Yuan¹, ZENG Hualun¹, TU Li¹

(1 School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

✉E-mail: fbao@xmu.edu.cn

Abstract Experimental studies are carried out for the complex flow characteristics of fluid in annulus of coaxial rotating conical cylinders. Emphasis is placed on qualitative and quantitative analysis concerning the effects of rotating speed and annular width, with respect to the generation and variation of spiral vortices and other annular flow characteristics, which are based upon flow visualization and the PIV measurements. The periodic motion of spiral vortex core under different inner cylinder speed and annulus width are analyzed. Results revealed that the periodic motion decreases with the increase of inner cylinder speed, and the periodic motion increases with the increase of annulus width. Instantaneous and mean flow field were checked to analysis the mechanism of spiral eddy motion in annulus. The influence and distribution of three kinds of Reynolds stress were studied with respect to different inner cylinder speed and annulus width. The radial normal Reynolds stress is always the largest when the rotational speed of the inner cylinder is variable, and the Reynolds shear stress stays minimum when the annular gap width changes.

Key words inter-annular flow, periodic motion of vortex center, dye tracing, PIV, inner cylinder speed

20 世纪初, Taylor 在两个同轴旋转的圆筒环隙流动实验中观察到当内外圆筒间间隙远小于圆筒半径且内外圆筒间相对速度达到一定临界值时, 环隙中存在一种二次流动现象, 此现象被称为泰勒涡 (又称 Taylor-Couette 流动)^[1]。将圆筒改进为圆台后, 同轴旋转圆台环隙间的流动被称为 CC 流。同轴旋转圆台环隙间的流动特性被运用到旋转液膜反应器的设计当中^[2], 可对大颗粒物质进行研磨与混合, 常用于肥料、造纸、塑料等化工生产过程中^[3-4]。

自发现泰勒涡后的一百多年来, 诸多学者对泰勒涡与 CC 流进行了多方面的研究。朱鹤^[5]在同心圆柱间隙壁面上设置沟槽, 通过数值模拟和 PIV 实验证明沟槽深度影响泰勒涡的轴向尺度, 沟槽深度

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (基金号 11072206), 福建省自然科学基金 (2012J01023)

英文基金项目: Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11072206); Natural Science Foundation of Fujian province(2012J01023)

网络首发时间: 2019-07-31 13:51:12 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20190731.1029.001.html>

在一定范围内对环隙间流体与壁面的对流换热有强化作用。李华鹏^[6]对非平行间隙同轴旋转圆台间流体流动现象进行的数值仿真分析,通过改变外圆台与地面的夹角(即外倾角),发现当外倾角增大时环隙间流场更易产生泰勒涡。Jirkovsky^[7]采用修正后的 Navier-Stokes 方程数值模拟计算了泰勒流场内速度变化曲线。在泰勒流与 CC 流的实验基础上,Wimmer^[8]提出了同轴圆锥旋转装置、同轴圆盘旋转装置、同轴椭球旋转装置,并研究了旋转速度与夹缝宽度对泰勒涡的影响。通过实验指出当夹缝宽度与雷诺数不变时,改变加速度会影响泰勒涡对数量。在恒定加速度上产生五对泰勒涡,在此基础上增加加速度,泰勒涡对会从五对增加至六对甚至七对。对于改变同轴旋转圆筒的壁面结构、改变同轴旋转圆台间隙平行度及不同形状的旋转装置环隙间流场都有大量的研究,同时,也有学者对同轴旋转倒置圆台环隙间流体流动进行探讨。Wimmer^[9]对如图 1 所示的装置进行了实验研究,并探讨了加速度、间隙宽度等参数的影响。发现同轴旋转倒置圆台中层流与同轴旋转圆柱中的层流不同,呈三维状。文普^[10]用数值模拟的方法研究了同轴旋转倒置圆台间流体从层流到泰勒涡的产生过程及过程中压力与速度的极值分布。当雷诺数大于 300 时产生第一对泰勒涡,随着雷诺数的增大,泰勒涡对增加。当雷诺数达到 800 时,圆台间存在六对泰勒涡对。压力与速度的极值存在于两涡的交界处或大涡的涡心位置,同时速度极小值点对应压力的极大值点。张晶晶采用数值模拟方法研究正置和倒置两种同轴旋转圆台装置的泰勒涡和压力分布的差异^[11-12]。然而,以上研究均未系统地定性定量分析内筒旋转速度和间隙宽度对同轴旋转倒置圆台环隙间流体流动特性的影响。

本文将通过染色液流动显示实验和 PIV 流场测量研究同轴旋转倒置圆台环隙间流体流动特性。染色液显示实验定性分析同轴旋转倒置圆台环隙间螺旋涡的产生及变化过程。PIV 流场测量定量分析同轴旋转倒置圆台环隙间流体速度、涡量等的变化。通过定性定量分析同轴旋转倒置圆台环隙间流体流动特性,为此类型反应器装置的实际应用提供参考数据。本文以逆时针旋转的涡为正涡,顺时针旋转的涡为反涡。

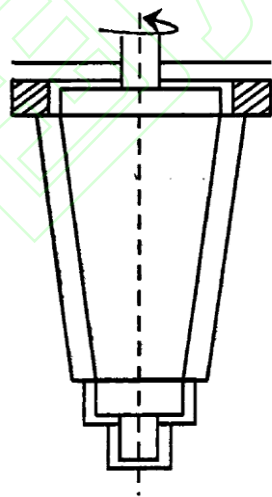


图 1 Wimmer 的实验装置图
Fig 1 Experimental devices of Wimmer

1 实验设备与流程

实验设备主要有同轴旋转倒置圆台实验模型、步进电机控制系统、PIV 技术测试系统及放置实验模型等器材的铝制试验台。

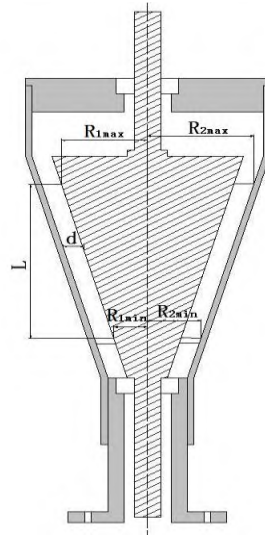


图 2 倒置圆台装置
Fig 2 Conical cylinders devices

同轴旋转倒置圆台实验模型如图 2 所示。内外圆台均倒置放置，上半径大于下半径。内外圆台轴线位于一条直线上，且倾斜角度均为 $\varphi=16^\circ$ 。内圆台上下半径固定不变，上半径为 $R_{1\max}=70.1\text{ mm}$ ，下半径为 $R_{1\min}=27.7\text{ mm}$ ；外圆台上下半径随间隙宽度改变，上半径为 $R_{2\max}$ ，下半径为 $R_{2\min}$ 。此装置通过调整下底座的螺纹设置间隙宽度的大小，保持内外圆台倾斜角不变，故内外圆台间隙宽度为 $d=R_{2\min}-R_{1\min}=R_{2\max}-R_{1\max}$ 。环隙间上壁面为自由液面，下壁面为端盖，上下壁面之间高度固定为 $L=140\text{ mm}$ 。为了尽可能防止内筒壁面对激光的反射作用，进而减小反射对环隙间流场的测量造成的影响，将同轴旋转倒置圆台内圆台壁面涂成黑色；外圆台则采用透明的亚克力板制成，便于激光照入及拍摄观察环隙间流场。实验时内筒旋转，外筒固定不动。

实验所用步进电机为三相步进电机，步进电机的控制器通过程序编码将速度和加速度等参数传送到驱动器，驱动器将速度参数以脉冲信号的形式传给步进电机。步进电机控制系统通过联轴器连接同轴旋转倒置圆台装置并控制其内筒的旋转速度。

PIV 测试系统全称粒子成像测速技术，主要包括激光器、高速相机、同步器、示踪粒子等；激光器的最大输出功率为 15 W ，波长为 532 nm ，输出脉冲频率为 40 kHz 。相机分辨率为 200 万像素，其满频触发频率为 1 kHz ^[13]。图像分析软件则采用 DynamicStudio 软件，进行图像数据采集和数据分析等。

采用上述设备进行染色液流动显示实验和 PIV 流场测量。实验设置间隙宽度和内筒转速两个变量，其中内筒转速有脉冲速度 (pulses/s) 和旋转速度 (r/min) 两种，二者可根据步进电机一个脉冲信号带动内筒旋转角度进行换算，本文使用脉冲速度。间隙宽度设置 11.5 、 14 、 16.5 、 19 、 21.5 mm 共 5 个变量；脉冲速度设置 50 、 100 、 200 、 300 、 400 、 500 、 700 、 1100 、 1300 、 1500 pulses/s 共 10 个变量。雷诺数定义为 $Re=\rho*v*d/\nu$ ；流体密度 $\rho=1000\text{ kg/m}^3$ ；流体流速 $v=\omega*R_{1\max}$ ，其中内筒角速度 $\omega=2\pi n/60\text{ rad/s}$ ，内筒转速为 n ， $R_{1\max}=70.1\text{ mm}$ ； d 为间隙宽度；实验水温维持在 $18\text{ }^\circ\text{C}$ ，其粘度 $\nu=10.62\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ 。我们可根据圆台内筒转数与间隙宽度计算出不同情况下流体的雷诺数。实验流程图如图 3 所示：

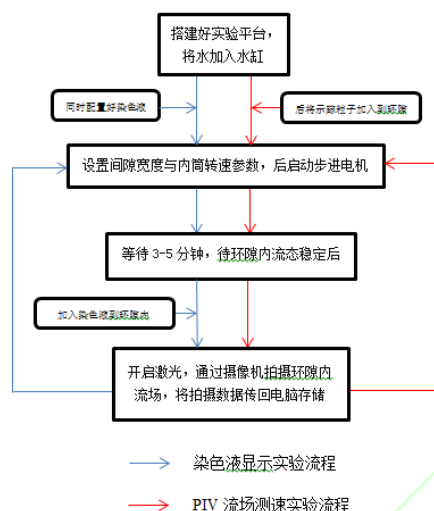


图 3 实验流程图
Fig 3 Tree of experiment

2 环隙间螺旋涡周期性变化过程

2.1 染色液流动显示实验结果分析

透明流体的流动状态一般难以直接用肉眼观察，采用物理或化学手段显示测试区域流场变化的实验方法即为流动显示方法^[14]。在同轴旋转倒置圆台环隙间倒入染色液，通过染色液流动显示实验，可以定性地观察到环隙间螺旋涡的产生过程。本实验所用染色液为牛奶与酒精配比所得，该染色液具有粘度适中、密度和水一致、良好的跟随性等优点。进行实验时，间隙宽度 $d=14\text{ mm}$ 保持不变。

当雷诺数较小时，环隙间均为层流。内筒转速为 50 pulses/s 时，由于内筒转速太小，雷诺数未达到层流与湍流的转捩点，所以环隙间子午面上并无明显的螺旋涡出现，只能大致分辨出环隙间流体的流向，如图 4 所示。

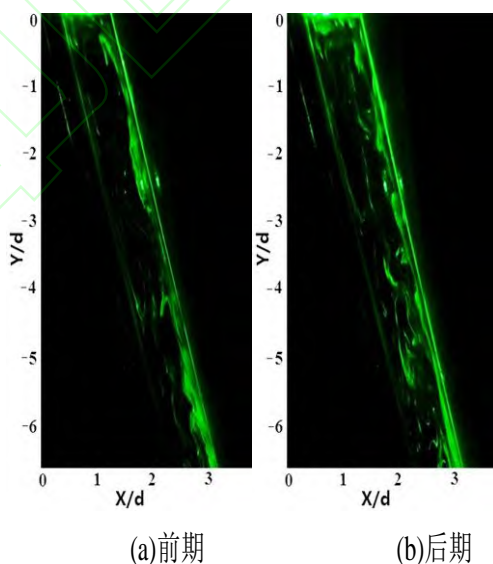


图 4 $d=14\text{ mm}$, $n=50\text{ pulses/s}$ 时螺旋涡变化
Fig 4 The variation of spiral vortex at $d=14\text{ mm}$ and $n=50\text{ pulses/s}$

由于倒置圆台最大半径位置在最上方，所以离心力在最上方达到最大值，因此随着雷诺数的增大

流动失稳，在圆台最上方处形成第一对螺旋涡，随后向半径较小的位置运动。内筒转速 n 增大到 100 pulses/s 时，环隙间产生螺旋涡，总周期时间 T 为 34.4 s；内筒转速 n 为 200 pulses/s 时，总周期时间 T 为 13.4 s；内筒转速 n 为 300 pulses/s 时，总周期时间 T 为 8.4 s。三组内筒转数螺旋涡周期性变化规律几乎相同，以内筒转速 n 为 300 pulses/s 为例，依据图 5 分析螺旋涡周期性变化规律如下：

1. 图 5(a): $t=0T(0\text{ s})$ ，将由上向下依次命名子午面上的涡为涡 A1，B1 和 C1。正涡 A1 的长度大致为 $1.3d$ ，反涡 B1 被挤压成长方形形状。

2. 图 5(b): $t=0.36T(3.0\text{ s})$ ，正涡 A1 逐渐增大，长度达到 $1.7d$ 左右，其内部不稳定；涡 B1 和 C1 向下移动，形状被挤压变形。

3. 图 5(c): $t=0.57T(4.8\text{ s})$ ，正涡 A1 上方产生新涡 D1，反涡 D1 靠近内圆台表面；涡 A1 长度减小，涡 B1 和 C1 进一步向下移动。

4. 图 5(d): $t=0.71T(6.1\text{ s})$ ，在涡 D1 上方产生新正涡 E1，涡 D1 和 E1 长度较小；涡 A1 被向下挤压，形状轻微扭曲变形。

5. 图 5(e): $t=0.79T(6.6\text{ s})$ ，涡 D1 和 E1 逐渐增大，涡心位于中轴线上。

6. 图 5(f): $t=1T(8.4\text{ s})$ ，涡 D1 和 E1 进一步增大，其中涡 E1 长度达到 $1.3d$ ，涡 E1 和 D1 替代了图 5(a)中涡 A1 和 B1 的位置，周期结束，新的周期开始，不断循环。

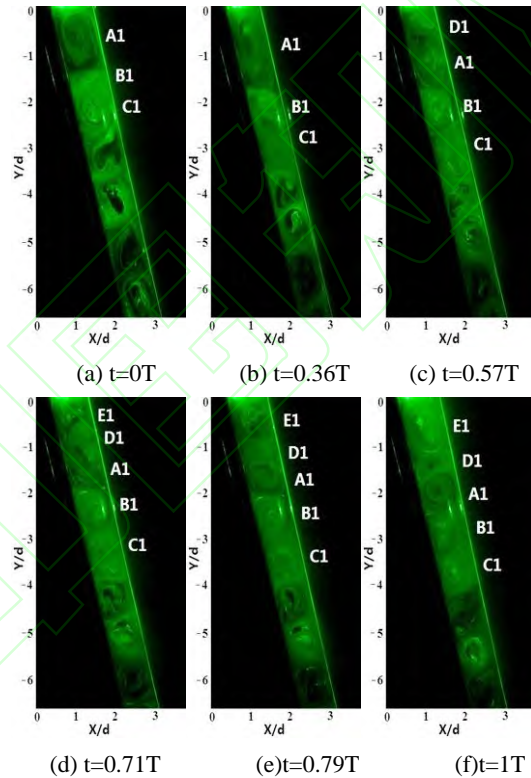


图 5 $d=14\text{ mm}$, $n=300\text{ pulses/s}$ 时螺旋涡变化
Fig 5 The variation of spiral vortex at $d=14\text{ mm}$ and $n=300\text{ pulses/s}$

2.2 PIV 测量结果分析

PIV 流场测量实验定量地分析螺旋涡周期性变化过程。同样以同轴旋转倒置圆台间隙宽度为 $d=14\text{ mm}$ ，内筒转速 $n=300\text{ pulses/s}$ 为例，取 15 s 至 25 s 一个周期时间为 10 s 来进行分析，如图 6 所示。

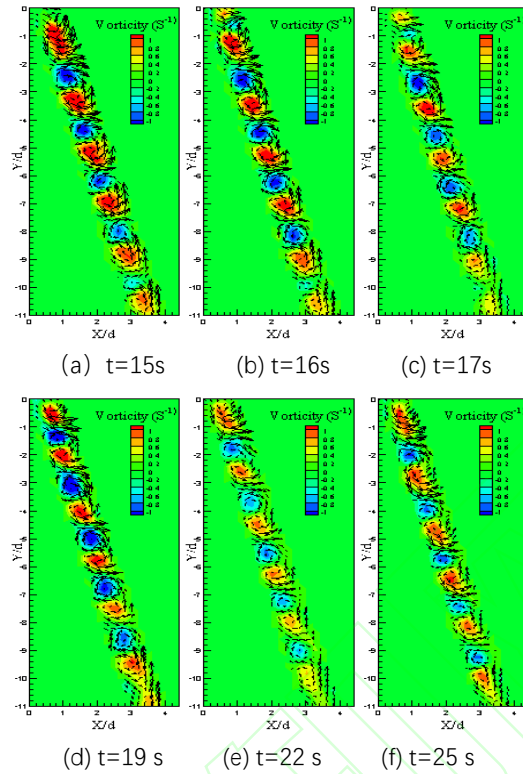


图6 $d=14\text{ mm}$, $n=300\text{ pulses/s}$ 螺旋涡周期
Fig 6 The spiral vortex period at $d=14\text{ mm}$ and $n=300\text{ pulses/s}$

通过观察离液面高度为 $-1d$ 位置第一个正涡的变化总结同轴旋转倒置圆台环隙中螺旋涡周期性变化规律。该正涡随着时间不断增大,而后破裂,在其上方产生一对新涡,新涡对不断增大,取代之前涡对的位置,重复周期性变化,在整个周期过程中环隙间螺旋涡会逐渐向下移动。在 $t=15\text{ s}$ 时,环隙间涡个数为11个;在 $t=16\text{ s}$ 时,首涡破裂产生新涡对,环隙间涡个数增加为13个;之后随着时间增长,新涡增大,螺旋涡不断下移,下方涡对逐渐消散,涡个数重新减小到11个。对任意时刻的螺旋涡状态进行分析发现,环隙间正涡占主导地位,所有涡对都会周期性地不断向下运动,与染色液流动显示实验结果相同。

3 螺旋涡涡心运动周期分析

子午面中轴线上径向速度为零或者涡量值为极值时,代表涡心所在位置。将PIV流场测速实验得到不同内筒转速与环隙宽度下同轴旋转倒置圆台环隙中的数据运用MATLAB软件分析,找出每个涡的涡心所在高度并且将其按照时间增长排列,得出涡心位置随时间的周期变化图。图中红色代表正涡涡心,蓝色代表反涡涡心。

3.1 内筒转速的影响

保持同轴旋转倒置圆台环隙宽度 14 mm 不变,研究内筒转速从 50 pulses/s 增大到 1500 pulses/s 时,环隙间涡心运动规律的变化。从图7可以看到,内筒转速变化,环隙间情况相同,都是正反涡交替,第一个涡为正涡,在周期中其上方会不断产生新涡并不断向下运动,而后在环隙下方逐渐消散。

内筒转速为 50 pulses/s 时,从图7(a)可见,环隙间存在一些杂乱无章的小涡,无明显的运动规律。内筒转速为 100 pulses/s 时,从图7(b)得出其第一个周期时间为 80 s 。由于环隙下方旋转角速度较小,涡对在高度为 $-7d$ 以下区域内逐渐失稳消散,导致该区域的涡心运动图较为混乱。内筒转速为 500 pulses/s 时,从图7(c)可得周期时间分别为 13 s 、 4 s 、 11 s 、 5 s ,为快慢交替周期。在 $15\text{ s}\sim 25\text{ s}$,高度 $-6d$ 的区域内存在扰动,使得该区域的涡心运动出现异常。因此以 36 s 时刻来计算环隙间涡数

量变化规律, 涡数量最大为 13 个, 最小为 11 个。内筒转速为 900 pulses/s 时, 从图 7(d) 可得周期时间分别为 5 s、5 s、5 s、5 s, 为单周期变化。环隙间涡数量变化规律为涡数量最大为 13 个, 最小为 11 个。内筒转速为 1300 pulses/s 时, 从图 7(e) 可得周期时间分别为 3 s、1 s、3 s、1 s, 为快慢交替周期。图中涡运动依然有周期性规律可寻, 但是混乱度明显变大, 无法分辨出环隙间涡数量变化规律。内筒转速为 1500 pulses/s 时, 从图 7(f) 可得周期时间分别为 1 s、1 s、1 s、1 s, 为单周期。环隙间涡数量变化规律为涡数量最大为 13 个, 最小为 11 个。

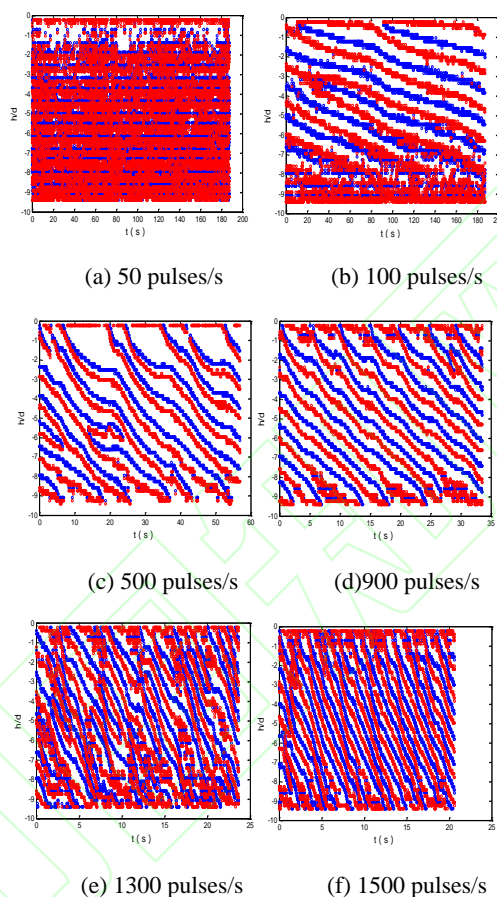


图 7 $d=14$ mm, 内筒转速不同时螺旋涡运动周期图
Fig7 $d=14$ mm, The periodic diagram of helical vortices under different rotating speed

根据不同内筒转速的螺旋涡涡心运动周期图可知: 除内筒转速为 900 pulses/s 和 1500 pulses/s 时涡心运动周期为单周期, 其余都是快慢交替周期, 内筒转速和周期类型之间并无明显的关联; 内筒转速和总周期时间存在关联, 随着内筒转速的提高, 总周期时间逐渐减小; 环隙间涡数量与内筒转速无关。

3.2 间隙宽度的影响

图 8 以同轴旋转倒置圆台内筒转速为 300 pulses/s 为例, 研究间隙宽度从 11.5 mm 增大到 21.5 mm, 环隙间螺旋涡涡心运动规律。

间隙宽度为 11.5 mm 时, 其分裂周期时间分别为 10 s、10 s、9 s、10 s, 为单周期。新涡对刚形成阶段, 环隙间涡数量为 16 个; 而后新涡对不断增大, 最上方涡对逐渐消散, 环隙间涡数量减小到 14 个。间隙宽度为 14 mm 时, 从图中可得周期时间分别为 11 s、17 s、12 s、17 s, 为快慢交替周期。环隙间涡数量变化规律为: 在新涡对刚形成之时, 环隙间涡数量为 13 个, 而后间隙上方第一个正涡不断增大, 间隙下方的一个涡对逐渐消散, 环隙间涡数量减少到 11 个; 并且快周期和慢周期两

者的环隙间涡数量变化规律相同。间隙宽度为 16.5 mm 时, 从图中可得周期时间分别为 13 s、20 s、12 s、20 s, 周期的类型为快慢交替周期。环隙间涡数量变化规律为涡数量最大 11 个, 涡数量最小 9 个。间隙宽度为 19 mm 时, 图中涡心运动较为混乱, 无明显周期性规律。间隙宽度为 21.5 mm 时, 图中只有一个首涡清晰可见, 当间隙宽度太大时, 其环隙间较难产生正反涡对交替的螺旋涡。

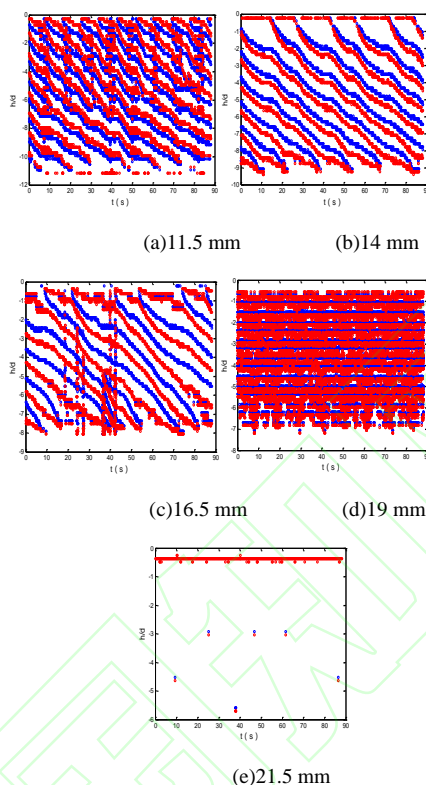


图 8 $n=300$ pulses/s, 间隙宽度不同时螺旋涡运动周期图
Fig 8 $n=300$ pulses/s, The periodic diagram of helical vortices under different annular width

根据不同间隙宽度的螺旋涡涡心运动周期图可知: 间隙宽度从 11.5 mm 增大到 16.5 mm, 总周期时间分别为 20 s、28 s、33 s, 随着环隙宽度增大, 总周期时间逐渐增大, 环隙间涡数量相应减小。间隙宽度从 11.5 mm 增大到 16.5 mm, 其环隙间涡数量依次为 16/14、13/11、11/9。

4. 螺旋涡产生的动力机制

将 PIV 实验分析得到的子午面流场速度矢量和涡量数据通过 *MATLAB* 软件, 计算出子午面时均流场分布以研究螺旋涡产生的动力机制。

4.1 时均流场

由于环隙间螺旋涡运动呈现周期性变化, 难以解释环隙间流场的整体流动趋势。因此对环隙间流场进行时均化处理得到时均流场, 从而分析环隙间流场的流动趋势。

4.1.1 内筒转速的影响

图 9 为同轴旋转倒置圆台间隙宽度 14 mm 时, 不同内筒转速下环隙间时均流场的变化。从图中我们可以看出, 间隙宽度为 14 mm 时, 内筒转速变化对螺旋涡形态无太大影响。流动趋势均为环隙间上方螺旋形流动, 其中正涡靠近内侧, 反涡靠近外侧, 以正涡为主导; 环隙下方为下凹型的由外向内流动, 并且内筒转速越大, 下凹型的弧度越大。且在相同间隙宽度时, 随着内筒转速增大, 最大涡量值和最小涡量值的绝对值总体上随之增大。

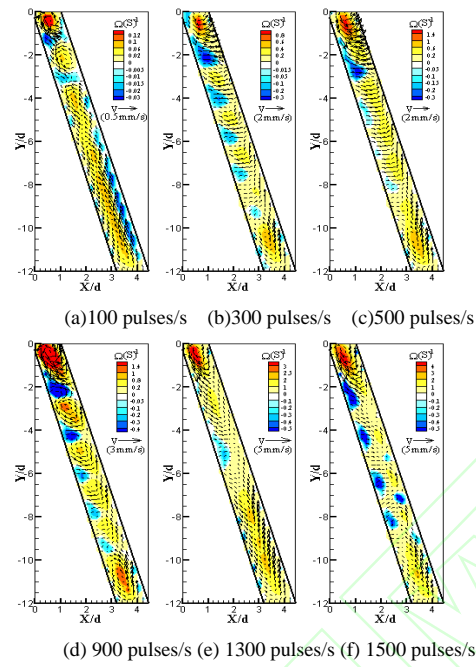


图 9 $d=14$ mm, 内筒转速不同时的时均流场
Fig9 $d=14$ mm, Instantaneous and mean flow field under different rotating speed

4.1.2 间隙宽度的影响

图 10 为同轴旋转倒置圆台在内筒转速为 500 pulses/s 时, 不同间隙宽度下环隙间的时均流场。对于螺旋涡形态, 从图中我们可以看出, 在间隙宽度为 11.5 mm、14 mm、16.5 mm 时, 环隙间上半部分保持螺旋涡状态, 环隙下半部分流动趋势则各不相同, 分别为由外向内向上流动、下凹型由外向内流动、逆时针回旋式流动。间隙宽度为 19 mm 和 21.5 mm 时, 环隙间已无螺旋涡, 为下凹型由外向内流动, 在环隙顶部接近液面处会由内向外流动, 由此在顶部产生一个逆时针流动的正涡。且在相同内筒转速时, 随着间隙宽度增大, 最大涡量值和最小涡量值的绝对值总体上先增大后减小。

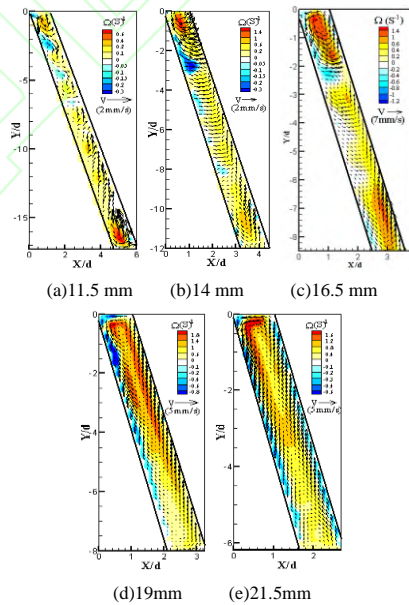


图 10 $n=500$ pulses/s, 间隙宽度不同时的时均流场
Fig10 $n=500$ pulses/s, Instantaneous and mean flow field under different annular width

4.2 动力机制分析

在同轴旋转倒置圆台间隙中，离心力随着半径由上到下的减小呈线性分布。间隙中的流体由于离心力的失衡形成三维基态流动^[8]，流动开始于最大半径处沿外部圆台以螺旋形式移动至最小半径处，后仍以螺旋形式沿内部圆台流回最大半径处，如图 11 所示。

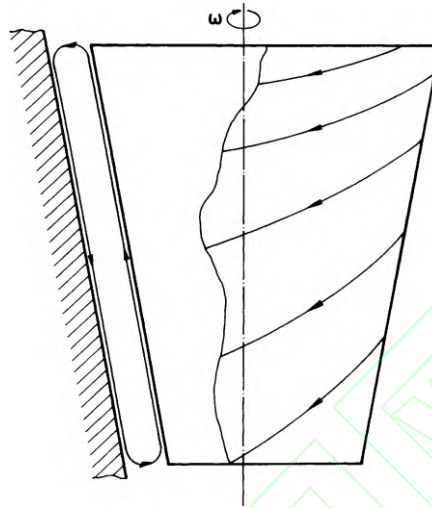


图 11 三维基态流^[8]
Fig11 3-D ground state flow^[8]

通过对时均流场的观察分析，改变旋转速度和环隙宽度后，同轴旋转倒置圆台中的流态有以下三种情况：下凹型的由外向内流动、由外向内向上流动、逆时针回旋式流动。由此可见，其总趋势均为由外向内的逆时针流动。环隙间流态主要由离心力与静压力双重作用。静压力是各向同性的，依据伯努利定律，当转速提高时，内圆台旋转，贴近其壁面流体流速快而压强低，流体有从外向内压进来的趋势。且越靠近内壁周向流速越大，且越往上半径越大故周向流速也越大，壁面附近的流体受到向内向上的静压差吸力，因此无论各工况下环隙外环均总体呈现逆时针流动趋势。

5 雷诺应力分析

雷诺应力又称湍流应力，是流动中脉动动量交换所引起的附加应力。可以通过雷诺应力数值观察各向异性的湍流流场。本文中 $\overline{U'^2}$ 表示雷诺径向正应力， $\overline{V'^2}$ 表示雷诺轴向正应力， $U'V'$ 表示雷诺切应力^[15]。

5.1 内筒转数的影响

图 12 以倒置圆台下间隙宽度为 14 mm，选取内筒转速 100 pulses/s、300 pulses/s、500 pulses/s 为例，研究其环隙子午面上雷诺应力的分布情况。

由于同轴旋转倒置圆台为半径上大下小，其环隙上方的旋转角速度更大，所以雷诺应力随着高度的降低逐渐减小，倒置圆台的雷诺应力主要集中在环隙上半部分，即高度大致在 -1d 到 -7d 的范围内。内筒转速为 100 pulses/s 时，雷诺径向正应力主要集中在高度 -1d 到 -2.5d 之间；随着内筒转速增大，雷诺径向正应力的集中区域会扩大到高度 -1d 到 -6d 之间。雷诺径向正应力主要分布在环隙中央区域，雷诺轴向正应力则是主要分布于环隙中部靠近两边壁面位置。随着内筒转速的增大，三种雷诺应力也随着增大；同时我们可以发现在同一条件下，三种雷诺应力中雷诺径向正应力最大。

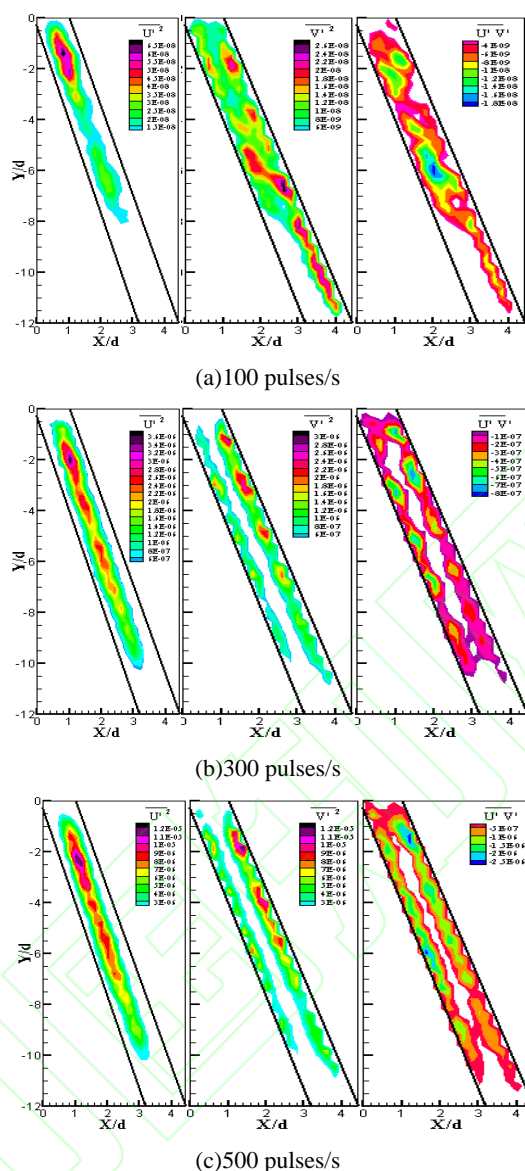


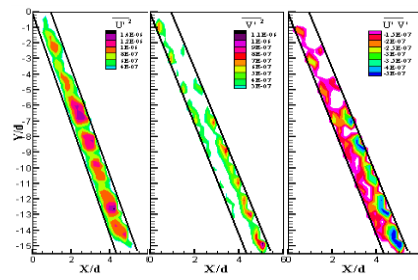
图 12 不同内筒转速时的雷诺应力分布
Fig12 Reynolds stress distribution under different rotating speed

5.2 间隙宽度的影响

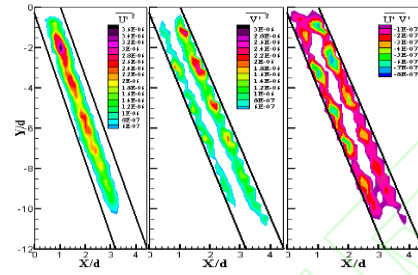
图 13 以倒置圆台下内筒转速 300 pulses/s, 研究五种不同间隙宽度下环隙子午面上雷诺应力的分布情况。

随着间隙宽度增大, 环隙间雷诺径向正应力分布差异较大, 数值总体上先增后减; 在间隙宽度为 11.5 mm 时, 雷诺径向正应力以螺旋涡形态分布; 间隙宽度为 14 mm 和 16.5 mm 时, 雷诺径向正应力以细长条形态分布; 间隙宽度为 19 mm 和 21.5 mm 时, 间隙过宽导致环隙间为湍流涡状态, 雷诺径向正应力会突然减小, 只集中在高度 0d 到 -1d 的范围内; 随着间隙宽度增大, 环隙间雷诺轴向正应力分布大致相同, 均主要分布于环隙两侧靠近壁面区域; 而雷诺切应力分布随着间隙宽度增大并无明显规律。

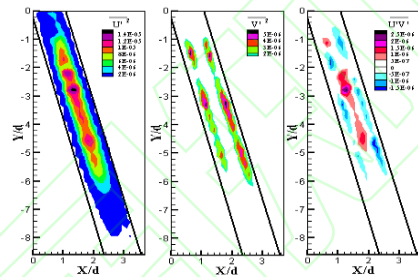
同一内筒转速下, 雷诺切应力始终最小, 且其数值量级远小于雷诺径向正应力和雷诺轴向正应力; 间隙宽度为 11.5 mm、14 mm、16.5 mm 时, 雷诺径向正应力大于雷诺轴向正应力; 间隙宽度为 19 mm 和 21.5 mm 时, 雷诺轴向正应力大于雷诺径向正应力。



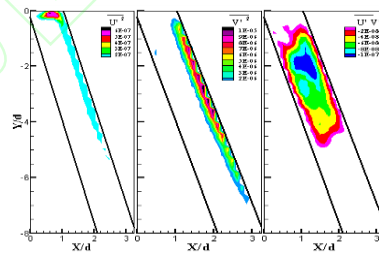
(a) 11.5 mm



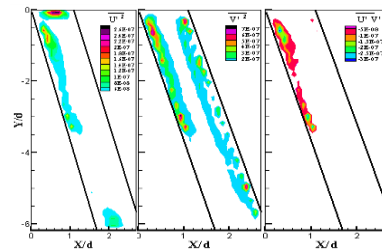
(b) 14 mm



(c) 16.5 mm



(d) 19 mm



(e) 21.5 mm

图 13 不同间隙宽度时的雷诺应力分布
Fig13 Reynolds stress distribution under different annular width

5.3 雷诺应力的分布

以间隙宽度为 14 mm 为例, 定量对比不同内筒转速下环隙间中轴线上的雷诺应力分布。从图 14 中我们可以看出雷诺径向正应力相比雷诺轴向正应力折线起伏较小, 并且在相同内筒转速下, 雷诺径向正应力在数值上大于雷诺轴向正应力。雷诺径向正应力和雷诺轴向正应力主要集中在环隙中部区域, 即高度在 $-1d$ 至 $-7d$ 之间。雷诺径向正应力与内筒转速存在正相关关系, 随着内筒转速增大, 雷诺径向正应力也随之增大。不同内筒转速下, 雷诺轴向正应力虽相差较小, 但随着内筒转速增大, 雷诺轴向正应力总体趋势上也相应增大。雷诺切应力以正值为主, 随着高度变化, 折线起伏较大; 与内筒转速无明显关系。

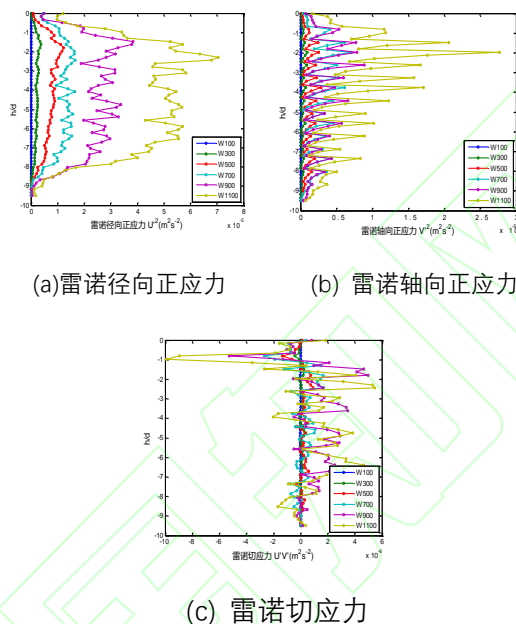


图 14 内筒转速不同时, 中轴线上雷诺应力分布
Fig14 Reynolds stress distribution on midline under different rotating speed

6 总结

本文通过染色液显示试验和 PIV 流场测速试验对同轴旋转倒置圆台环隙间流体流动特性进行探究, 对实验结果进行定性及定量分析, 探讨旋转速度和环隙宽度对倒置圆台环隙间流体流动特性的影响, 得出以下结论:

- 1) 染色液显示实验和 PIV 流场测速实验结果分别定性和定量得出同轴旋转倒置圆台环隙间流体螺旋涡的产生及发展过程: 正涡占主导作用, 所有涡对运动呈周期性变化。
- 2) 螺旋涡涡心运动周期与内筒转速、环隙宽度的关系: 内筒转速和总周期时间存在关联, 随着内筒转速的提高, 总周期时间逐渐减小; 随着间隙宽度增大, 总周期时间逐渐增大。
- 3) 通过时均流场的分析, 发现改变旋转速度和环隙宽度后, 同轴旋转倒置圆台中的流态, 在向内向上的静压差吸力和离心力的作用下, 总趋势均为由外向内的逆时针流动。
- 4) 雷诺径向正应力主要分布在环隙中央区域, 雷诺轴向正应力则是主要分布于环隙中部靠近两边壁面位置。内筒转速和环隙宽度与三种雷诺应力大小的关系: 内筒转速变化, 雷诺径向正应力始终最大; 环隙宽度变化, 雷诺切应力始终最小。

参考文献 (References)

- [1] Taylor G I. Stability of a Viscous Liquid Contained between Two Rotating Cylinders[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1923, 223(718):289-343.
- [2] Daniel C, Kunihiro T. Two-dimensional compressible viscous flow around a circular cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 785:23.
- [3] 韩晓婷, 常青, 毛玉红, et al. Taylor-Couette 流场数值模拟及絮凝效果研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1637-

1641.

- [4] 毛玉红. 流场涡形态对混凝效果的影响研究[D]. 兰州交通大学, 2017.
- [5] 朱鹤, 刘栋, 汤承, et al. 沟槽深宽比对泰勒涡流影响的研究[J]. 工程热物理学报, 2016, V37(6): 1208-1211.
- [6] 李华鹏. 非平行间隙同轴旋转圆台间流体流动的数值模拟和理论分析[D]. 北京化工大学, 2014.
- [7] Jirkovsky L, Bo-Ot L M. Taylor-Couette flow and a molecule dependent transport equation[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2014, 415:205-209.
- [8] Wimmer M. Taylor vortices at different geometries[M]// Physics of Rotating Fluids. Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [9] Wimmer M. An experimental investigation of Taylor vortex flow between conical cylinders[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 292(-1):205-227.
- [10] 文普. 同轴旋转圆台间流体流动的理论研究和数值模拟[D]. 北京化工大学, 2010.
- [11] 张晶晶. 旋转液膜反应器内流体流动的动力学研究[D]. 北京化工大学, 2013.
- [12] 张晶晶, 张艺晓, 许兰喜. 旋转液膜反应器内流动机理研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2013, 40(2): 117-120.
- [13] 鲍锋, 曾华轮, 邹赫, et al. 同轴旋转圆台环隙流动机制及实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, v. 44; No. 306(08): 12-21.
- [14] 王强. 流动显示技术综述[J]. 电力环境保护 1992, 8(4): 32-35.
- [15] 李聪洲, 张新曙, 胡晓峰, et al. 高雷诺数下多柱绕流特性研究[J]. 力学学报, 2018.